

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ДВУХФАЗНОЙ СТАЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ HIGH STRENGTH DUAL-PHASE STEEL STRUCTURE EVOLUTION DURING HOT ROLLING

Безобразов Юрий, Наумов Антон

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет; Россия, г.Санкт-Петербург,
ул.Политехническая, 29, nw86master@mail.ru

Abstract

The influence of continuous mill 2000 hot rolling parameters on the high strength dual-phase (DP) steel structure evolution was investigated. Computer simulation of structure and mechanical properties formation was realized with the help of *Hot Strip Mill Model (HSMM)*, *ThermoCalc*, *AusEvol+* programs. Physical simulation of metal thermomechanical treatment was made by *Gleeble-3800*. Varying the thermomechanical treatment parameters the ferrite-martensitic (FM) dual-phase steels are received.

Введение

Практический интерес к двухфазным ферритно-мартенситным (ДФМ) сталям обусловлен возможностью сочетания высокой прочности и пластичности, а также высокой скорости деформационного упрочнения и низкого предела текучести [1]. Это позволяет эффективно применять ДФМ стали для изготовления деталей автомобиля методами холодной штамповки. Микроструктура ДФМ стали представляет собой мягкую матрицу – феррит, упрочнённую мелкодисперсным прочным мартенситом и остаточным аустенитом. Получение штампуемых горячекатаных ДФМ сталей осуществляется на непрерывных

широкополосных станах (НШПС). Эти стали по структуре и свойствам близки к классическим ДФМ сталям, получаемым путём термической обработки. Цель настоящей работы – исследование влияния параметров горячей прокатки, применяемых на непрерывных широкополосных станах 2000, на формирование структуры и свойств высокопрочной двухфазной стали.

Методика проведения исследований

В табл. 1 представлен химический состав исследуемой стали и равновесные температуры превращений.

Химический состав исследуемой стали

Таблица 1

Химический элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	V	A _{e3}	A _{e1}
Содержание (масс.), %	0,11	0,66	1,55	0,01	0,006	0,03	0,03	0,05	0,03	0,006	0,005	809	701

Для моделирования формирования структуры и механических свойств стали использовали компьютерные программы:

- Многофункциональная программа *HSMM* позволяет выполнять моделирование процесса прокатки полосы на непрерывных и реверсивных станах горячей прокатки. Компьютерное моделирование горячей прокатки на стане 2000 выполняется при помощи существующей виртуальной модели стана, разработанной в программе *HSMM* [2].

- Программа *AusEvol+* позволяет рассчитывать процессы роста зерна аустенита, термического возврата, динамической и статической рекристаллизации [3,4], кривые пластического течения, уровень остаточного упрочнения, а также выпадения карбонитридов микролегирующих элементов по заданным параметрам обработки и химическому составу материала [5];

Физическое моделирование режимов обработки металла выполняли на термомеханическом симуляторе *Gleeble-3800*.

На рис.1 представлена схема стана 2000 с условными обозначениями оборудования.

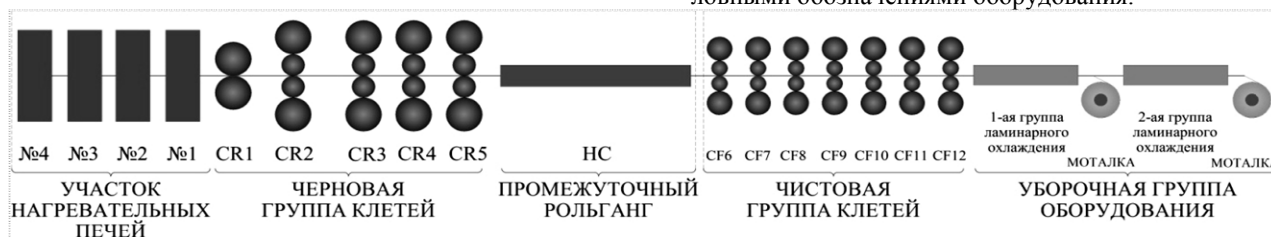


Рис.1. Схема стана 2000

Основные условия функционирования агрегатов прокатного стана для достижения минимального размера зерен аустенита и получения требуемой ДФМ структуры заключаются в следующем:

Участок нагревательных печей и черновая группа клетей:

1. Нагрев заготовки в печи;
2. Максимально возможные обжатия в клетях, исходя из энергосиловых параметров используемого оборудования;

Промежуточный рольганг:

1. Минимальное время выдержки для выравнивания температуры по длине полосы ($\Delta T < 30$ °C) при чистовой прокатке;

Чистовая группа клетей и уборочная группа:

1. Максимально возможные обжатия в клетях, исходя из энергосиловых параметров используемого оборудования, для достижения конечной толщины полосы менее 3 мм;
2. Накопление остаточного деформационного упругости перед фазовым превращением;

3. Контролируемое охлаждение полосы на установке ламинарного охлаждения (УЛО) для выделения феррита и получения ФМ структуры.

Компьютерное моделирование горячей прокатки

Моделирование горячей прокатки проводили в программе *HSMM*, а моделирование эволюции структуры при прокатке в программе *AusEvol+*. При моделировании режимов прокатки на стане 2000 с использованием программы *HSMM* в качестве базовой марки стали выбрана сталь А36.

Рассмотрено 16 режимов прокатки полосы для получения двухфазной структуры (табл.2), различных по температуре нагрева в печи №1, по скорости черновой прокатки, по скорости чистовой прокатки. Толщину исходного сляба принимаем равной 150 и 250 мм.

Т а б л и ц а 2

Результаты компьютерного моделирования прокатки с использованием программ *HSMM*, *AusEvol+*

Температура нагрева в печи 1195°C											
№	V_1 , м/с	V_2 , м/с	Выдержка на роль- ганге, с	h_0 , мм	h_1 , мм	Т-ра конца черновой прокатки, °C	Т-ра на- чала чис- товой прокатки, °C	Т-ра конца чистовой прокатки, °C	Т-ра смотки, °C	$t_{\text{удл}}$, с	Конечное зерно ау- стенита, мкм
1	2	4	40	150	2,45	1033	782	670	468	66	44,6
2	4	4	60	150	2,25	1054	790	664	452		47,6
3	2	4	60	250	2,75	1081	827	718	508		67,8
4	4	4	90	250	2,95	1114	846	734	525		78,4
5	2	12	0	150	1,75	1033	867	803	627	21	38,7
6	4	12	0	150	1,55	1054	910	813	615		27,2
7	2	12	0	250	1,95	1081	928	860	664		25,3
8	4	12	30	250	1,95	1113	942	869	669		22,4
Температура нагрева в печи 1100°C											
9	2	4	25	150	2,5	985	790	683	478	66	31,1
10	4	4	55	150	2,55	1018	816	701	489		38,8
11	2	4	50	250	3,3	1024	837	749	549		45,5
12	4	4	60	250	3,15	1050	870	762	547		46,1
13	2	12	0	150	2	985	856	812	647	21	27,4
14	4	12	0	150	1,85	1018	915	843	652		17,9
15	2	12	0	250	2,45	1024	914	874	702		17
16	4	12	15	250	2,3	1050	950	894	706		11

В табл. 2 приняты обозначения: V_1 – скорость выхода полосы из пятой клетки черновой группы; V_2 – скорость выхода полосы из последней клетки стана; h_0 –

толщина исходного сляба; h_1 – толщина полосы после прокатки; T – температура; $t_{\text{уло}}$ – время нахождения полосы на УЛО при свободном охлаждении до смотки.

На рис. 2,а представлен результат расчёта режима №16 в программе *AusEvol+*, который показывает измельчение зерен аустенита в каждой клетке черновой и чистовой группы, а также накопление остаточного упрочнения перед фазовым превращением в

а) б)

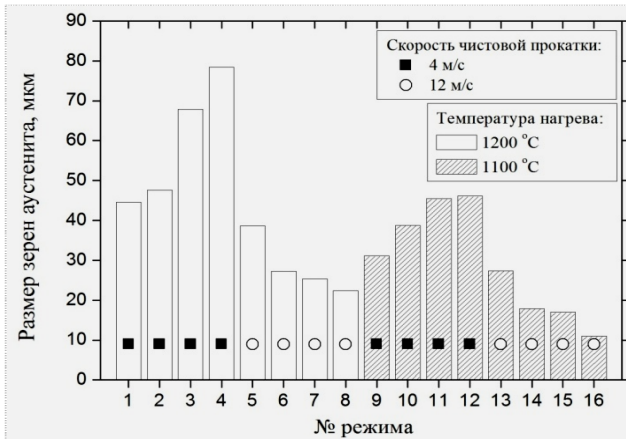
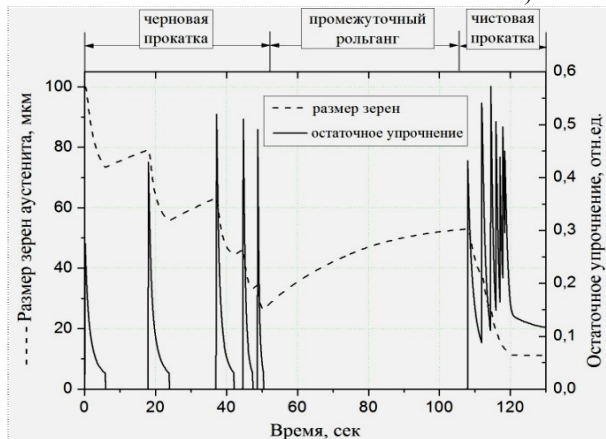


Рис. 2. Результаты расчёта конечного размера зерен аустенита и остаточного упрочнения от времени обработки, начиная от 1-ой клетки стана, при исходном размере зерна аустенита 100 мкм после прокатки по режиму 16, см. табл.2, (а) и зависимость размера зерна аустенита от температуры нагрева и от скорости прокатки для 16-ти режимов (б)

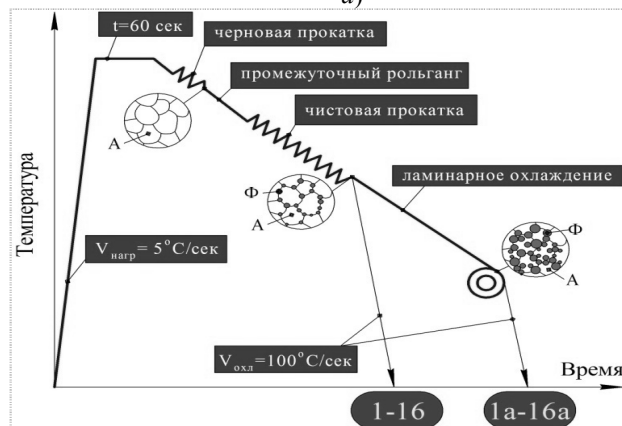
Физическое моделирование горячей прокатки

Разработанные с помощью программы *HSMM* режимы прокатки (см. табл. 2) были реализованы на комплексе *Gleeble-3800*. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3,а. Основной целью эксперимента является:

- **Режим №1-16:** определение доли феррита, который выделился в чистовой группе клетей;
- **Режим №1а-16а:** определение доли феррита, который выделился в чистовой группе клетей и на УЛО до смотки.

После физического моделирования горячей прокатки проведён количественный и фазовый анализ полученных микроструктур при помощи анализа

а)



тора изображений — программы *ThixometPro*. Результаты анализа представлены на рис. 4, 5. Полученная зависимость на рис. 3,б позволяет оценить долю выделившегося феррита в зависимости от параметров режима горячей прокатки.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что для каждого режима характерно увеличение доли феррита (рис. 4) во время свободного охлаждения полосы ($V_{охл}=5-15$ °C/сек) при движении от клетки CR12 до дальней группы моталок DC№2. Кроме того, при увеличении времени $t_{уло}$ доля феррита также увеличивается. Максимальное количество феррита было получено по режиму 1а, а минимальное по режиму 16а.

б)

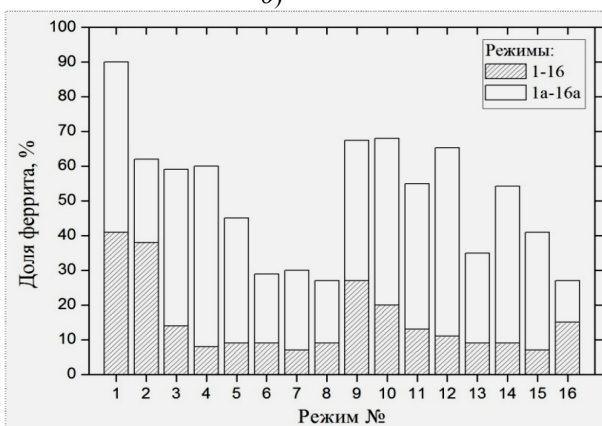


Рис. 3. Схема обработки исследуемой стали на *Gleeble-3800* (а) и зависимость доли феррита от режима прокатки (б)

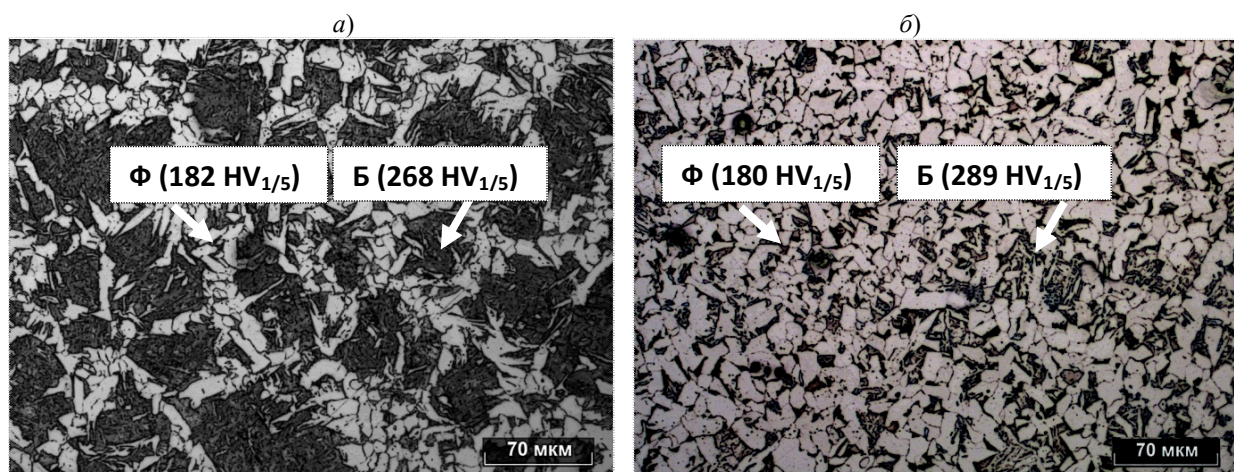


Рис. 4. Микроструктура стали после обработки на комплексе *Gleeble*: а – по режиму 1; по б – режиму 1а, $\times 500$; на фотографиях указана микротвердость отдельных структурных составляющих (Ф – феррит, Б – бейнит)

Определение механических свойств

Для определения механических свойств было выбрано 4 режима, отличающихся содержанием феррита: режим №1а, 14а, 15а, 16а. Выбранные режимы горячей прокатки были реализованы на комплексе *Gleeble-3800* по схеме на рис.3а с последующей закалкой водой (скорость охлаждения $\sim 12\,000\,^{\circ}\text{C}$) для получения ФМ структуры. Результаты механических испытаний образцов представлены в табл.3. На рис. 5,а представлены кривые пластического течения, а на рис.5,б – положение двухфазных сталей, полученных в данном исследовании и положение двухфазных сталей аналогичного химического состава, производимых компанией ArcelorMittal для полосы толщи-

ной до 3 мм, на диаграмме «прочность – пластичность» [6].

Механические свойства стали 09Г2С после обработки

Таблица 3

Режим №	Доля феррита, %	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	$\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$
1а	90	414	789	28	0,52
14а	54	496	912	17	0,54
15а	41	709	1079	11	0,66
16а	27	628	1162	11	0,54

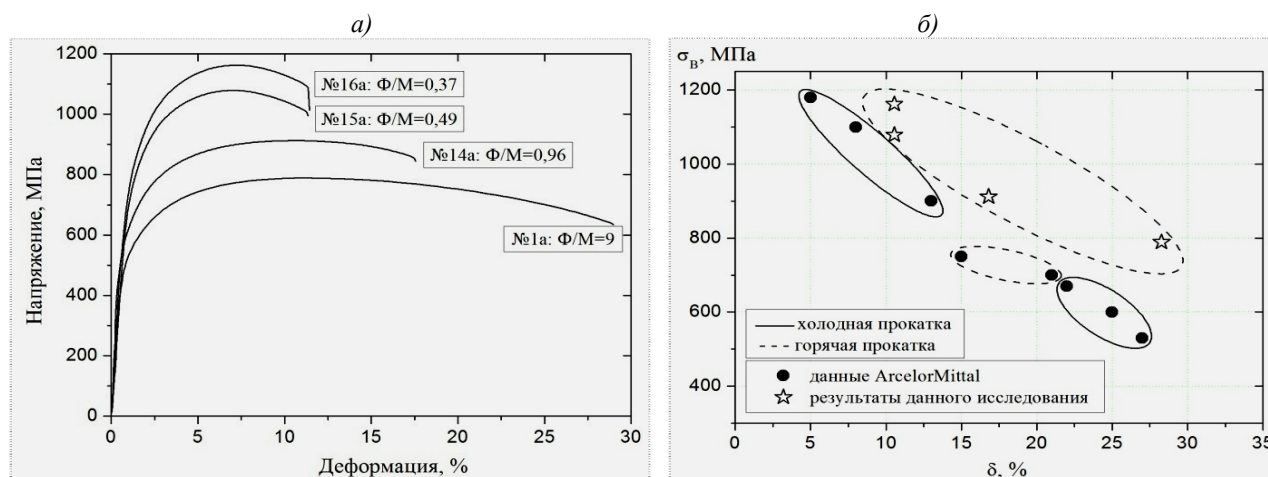


Рис. 5. Кривые пластического течения при растяжении образцов, обработанных по режимам: №1а, 14а, 15а, 16а (а); соотношение между пределом прочности и пластичностью двухфазных сталей по данным ArcelorMittal и двухфазной стали, полученной в данном исследовании (б)

Выводы

1. С помощью методов компьютерного (*HSMM*, *AusEvol+*) и физического (*Gleeble-3800*) моделирования определена зависимость конечного размера зерна аустенита, во многом определяющего конечные свойства двухфазной стали, от температуры нагрева в печи и скорости чистовой прокатки.
2. На непрерывном прокатном стане доля выделившегося феррита в двухфазной стали зависит от параметров прокатки в чистовой группе клетей.
3. Механические испытания образцов с ФМ структурой подтверждают возможность получения горячекатаных двухфазных сталей, которые по комплексу свойств превосходят двухфазные стали, полученные в результате холодной прокатки с последующим межкритическим отжигом.
4. Показано, что в зависимости от термомеханических параметров горячей прокатки, можно в широких пределах изменять структурное состояние и комплекс механических свойств стали. Например, сталь 09Г2С в результате горячей прокатки можно получить в ферритно-перлитном, бейнитном, а также в ферритно-бейнитном и ферритно-мартенситном состояниях.

Литература

1. Ming-hui CAI, Hua DING, Young-kook LEE, Zheng-you TANG and Jian-su ZHANG. *Effects of Si on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot-rolled Ferrite and Bainite Dual-phase Steels* // ISIJ International, Vol. 51 (2011), No. 3, pp. 476–481.
2. Колбасников Н.Г. Внедрение компьютерной программы HOT STRIP MILL MODEL (HSMM) в прокатное производство для управления структурой и свойствами сталей // «Научно-технические ведомости СПбГПУ». - 2007. - №3. - С. 38-47.
3. Ю.А. Безобразов, Н.Г. Колбасников. Формирование размера зерна аустенита в условиях статической и динамической рекристаллизации трубной стали Х90 // XL Неделя науки СПбГПУ: Ч. VI. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, с. 95-96.
4. A.A. Vasilyev, N.G. Kolbasnikov, S.F. Sokolov, D.F. Sokolov *Modeling of Static Recrystallization Kinetics in Complexly Alloyed Austenite* // MSE 2010, Darmstadt
5. <http://tmslab.spbstu.ru>
6. <http://www.arcelormittal.com/corp/>